



TITLE:

一次元磁性体のソリトン(物性におけるソリトンの統計力学とダイナミックス,科研費研究会報告)

AUTHOR(S):

斯波, 弘行

CITATION:

斯波, 弘行. 一次元磁性体のソリトン(物性におけるソリトンの統計力学とダイナミックス,科研費研究会報告). 物性研究 1982, 38(1): A28-A30

ISSUE DATE:

1982-04-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/90540>

RIGHT:

一次元磁性体のソリトン

物性研 其 波 弘 行

§1 はじめに

一次元磁性体は 以前から ソリトン研究の一つの場を提供して来たが¹⁾ CsNiF_3 の容易面に平行に磁場をかけると、適当な条件下で このスピンの sine-Gordon 系と等価になることが Mikeska によって示されてから²⁾ 実験的研究の対象にもなった。1980 年末の時点での この分野のまとめは 吉沢ら³⁾ のレビューに詳しい。ここでは このレビューの内容が読者に広く知られると仮定して、それ以後の一年間の動きについて述べる。1980 年末までの ソリトン研究の対象は CsNiF_3 , TMMC, CsCoCl_3 であった。この一年間でも 豊富的に 進歩がわたりない。

§2 CsNiF_3

CsNiF_3 という 強磁性的に結合した 一次元スピン系の容易面内の磁場をかけたとき、低温でスピンのねじれに相当する励起があり それを sine-Gordon の kink soliton と記述される。この Mikeska の指摘は、理論的に そのような kink soliton の存在を疑う者はいない。問題は 熱励起として、中性子非弾性散乱のセントラルピークの支配的励起かどうかということである。Reiter⁴⁾, Allroth-Mikeska⁵⁾ は セントラルピークに寄与する励起として、この kink soliton と magnon density fluctuation の両者を量的に評価して Kjens と Steiner⁶⁾ の実験的なセントラルピークには 両者がほぼ同程度ずつ寄与しているであろうと結論した。つまり CsNiF_3 の kink soliton は 熱励起として存在するが 実験的に あるいは 同定するが困難な点がある。最近 Steiner et al.⁷⁾ は 磁場に ほぼ 平行になるような散乱ベクトル $Q = (0.6, 0, -q_c)$ ($0 \leq q_c \leq 0.125$) と選んで ($H \parallel x$) transverse response (S^{xy} と S^{zz}) のみを観測出来るような条件を設定し magnon density fluctuation が 入り込まないような配置で測定をしたが、その結果は 万人を納得させるものではない。

要するに 熱励起ではなく 外部の 何らかの方法で soliton を励起しない限り この系について soliton の問題は 解決しないと思う。

§3 TMMC

TMMC ($(\text{CH}_3)_4\text{NMnCl}_3$) の場合 スピンは 反強磁性的に結合していて スピンは 容易面内に磁場をかけたとき 磁場の Ising 的異方性を誘起し その結果 反強磁性 (AF) の 2 つの等価な Neel 状態を 与えるが domain wall が soliton になっていて 低温で 重要な 熱励起である。³⁾ CsNiF_3 と比べて こちらは ほとんど問題がないことは ref. 3 に 述べられている通りだが 磁場の強いところ ($H > 60 \text{ kOe}$) で sine-Gordon 理論からのずれが見られた。⁸⁾ そのずれは NMR 及び Neel 温度 両方に顕著で、そのずれを Boucher ら⁸⁾ は 不純物効果としたが、これは おそらく 正しくない。

図 1 に ^{15}N の NMR の T_1 の H, T 依存性を示す。ここで 実験は Mikeska ら⁹⁻¹¹⁾ による sine-Gordon soliton 理論で、この理論によると soliton のエネルギーは $g\mu_B H S$ で H に 比例する。従って $T_1^{-1} \propto \exp(\alpha H/T)$ となるが この式から 系統的ずれが $H > 60 \text{ kOe}$ で見られる。実は このずれの原因を 正確に 強磁場では 今迄の理論⁹⁻¹¹⁾ を 修正する 必要が生ずる。¹²⁾ その点について 少し詳しく述べる。

TMMC は 一次元磁性体と ほぼ 等しい

$$H = 2J \sum_i [\vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1} - \delta S_i^z S_{i+1}^z] - g\mu_B H \sum_i S_i^z \quad (1)$$

と かける。ここで $J \sim 6.7 \text{ K}$, $S = 5/2$, $\delta = 0.01 \sim 0.02$ である。実験は $kT/2JS^2$,

$h = g\mu_B H / 4JS$ が小さいと3次元化している。そこでこれを
と小さいパラメータと12 (8と小さいパラメータとみなせる), この
小さい量に12 2次までとると上式は12)

$$\frac{\gamma\phi}{2JS^2} = \frac{1}{2} \int \frac{d\phi}{\alpha} \left[\left(\frac{1}{4JS} \right)^2 \left(\left(\frac{\partial\theta}{\partial t} \right)^2 + \left(\sin\theta \frac{\partial\phi}{\partial t} \right)^2 \right) \right. \\ \left. + \alpha^2 \left(\left(\frac{\partial\theta}{\partial t} \right)^2 + \left(\sin\theta \frac{\partial\phi}{\partial t} \right)^2 \right) \right. \\ \left. + \left(h^2 \sin^2\theta \sin^2\phi + 2\delta \sin^2\theta \cos^2\phi \right) \right] \quad (2)$$

但し θ, ϕ に対する canonical momentum は P_θ, P_ϕ は

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = 8JP_\theta - g\mu_B H \cos\phi, \quad \sin\theta \frac{\partial\phi}{\partial t} = 8J \frac{P_\phi}{\sin\theta} + g\mu_B H \cos\theta \sin\phi \quad \text{図1}$$

で表わされている。そこで θ, ϕ は $\vec{S}_i = (-1)^i S \left(\sin(\theta_i + (-1)^i \vartheta_i) \sin(\phi_i + (-1)^i \varphi_i), \right. \\ \left. \cos(\theta_i + (-1)^i \vartheta_i), \sin(\theta_i + (-1)^i \vartheta_i) \cos(\phi_i + (-1)^i \varphi_i) \right)$ で定義されている。

(2)式で見ると h^2 と 2δ の大小関係で2つの場合に分かれる。

[1] $h^2 \ll 2\delta$ ときは soliton は 図2 の path A に対応する
つまり a soliton (in-plane soliton) のエネルギーは $4JS^2 h$
 $= g\mu_B HS$ である。

[2] $h^2 \gg 2\delta$ ときは path B に対応する out-of-plane
soliton の in-plane soliton に比べてかわる。

[3] $h^2 \sim 2\delta$ の path A と path B へ switching が
起きる。

このような switching field $h_c = \sqrt{2\delta}$ の存在はこれまで
みられなかったが、強磁場での TMMC の soliton を考える
とき忘れなくてはならない。別の言い方をすれば TMMC の
soliton の記述は sine-Gordon では不十分である θ, ϕ と
いう2つの field を考慮しないといけない。

このことを測定可能な物理量で見るとは例として 相距離
離の逆数 K の H, T 依存性と関係づけられる。標準的な
transfer integral method を用いると (2) のモデルで K を
計算。次の "Schrödinger eq." の固有値を求める
ことに帰着する

$$\hat{H}_{\text{eff}} \Psi = E \Psi$$

$$\hat{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} \right) - \frac{1}{\sin^2\theta} \frac{\partial^2}{\partial\phi^2} \\ + \left(\frac{2JS^2}{kT} \right)^2 \left[h^2 \sin^2\theta \sin^2\phi + 2\delta \sin^2\theta \cos^2\phi \right]$$

これから求めた K をプロットすると 図3 のようになる。
もし Boucher らが解析に用いている sine-Gordon モデル (9-11)
が成り立つのであれば T により同一曲線になるはず
であるが、このように強磁場、高温で明瞭なずれが
みられる。この傾向は 図5 に示す T_f のデータとずれの
傾向と同じである。また K の結果を用いて、3次元
秩序温度 (Neel 温度) T_N を計算できる。その結果が
図4で ここでは実験データと直接比較にある。なお
図の中の破線が refs. 9~11 の sine-Gordon model で
これからみても単純な sine-Gordon model は強磁場

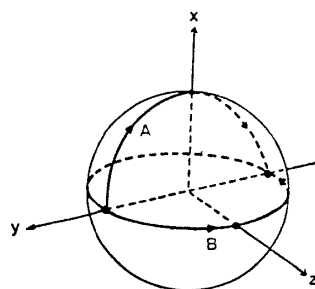
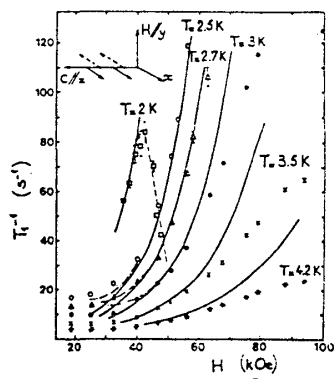


図2

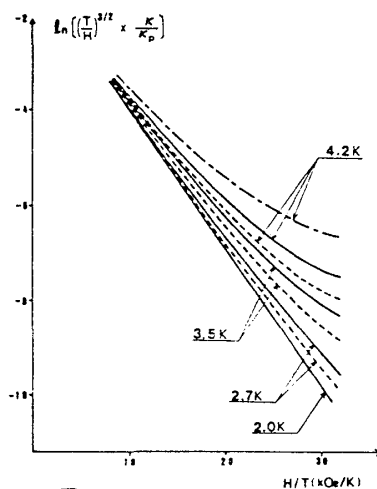


図3

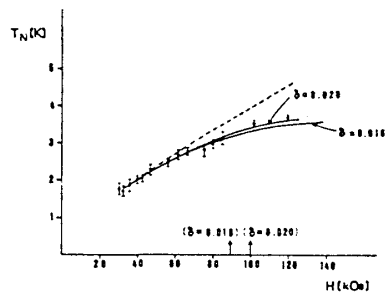


図4

では不十分である。TMMC の実験データからみると $H = 80 \sim 90 \text{ kOe}$ で上記の switching が起きていると期待され、この近辺は双極子相互作用から評価される δ の大きさや、TMMC の 2 つの spin 波のエネルギーの磁場依存性¹⁶⁾ともほぼ矛盾がない。こうして δ の増加と共に (2) 式のソリトンに switching が起るわけであるが このときのソリトンの運動しているときの形を求めるところにはまだ成功していない。これから問題である。

スペースがなくて誠に恐縮だが 極く最近 Boucher¹⁷⁾ は TMMC に Cu を稀薄にドーピングしたソリトンの抗散乱運動をしていらしめ実験結果を述べている。一次元磁気結晶 TMMC はシフトな元素がわかっている系であり、Cu をドーピングした場合についてもシフトな理論の展開が期待される。

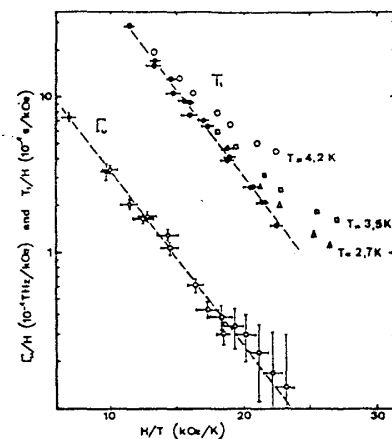


図 5

§4 CsCoCl_2

この系は一次元イジングの反強磁性体で spin が $1/2$ のため、ここでソリトンは量子力学的なものである。³⁾ これについては吉沢ら¹³⁾ に FMR 中子散乱がなされて、その存在が確認されている。この一年前にはこの系に ESR の実験¹⁴⁾ がなされ、ソリトン描像に基づく理論が提せられている¹⁵⁾ にて記すところである。

文献

- 1) K. Nakamura and T. Sasada : Phys. Letters 48A, 321 (1974)
- 2) H. J. Mikeska : J. Phys. C 11, L29 (1978)
- 3) 吉沢英樹, 斯波弘行, 平川金四郎 : 日本物理学会誌 36, 357 (1981)
- 4) G. Reiter : Phys. Rev. Letters 46, 202 (1981) and 46, 518 (1981).
- 5) E. Allroth and H. J. Mikeska : J. Phys. C 13, L725 (1980)
- 6) J. K. Kjems and M. Steiner : Phys. Rev. Letters 41, 1137 (1978)
- 7) M. Steiner et al : preprint
- 8) J. P. Boucher et al : J. Appl. Phys. 52, 1956 (1981)
- 9) H. J. Mikeska : J. Phys. C 13, 2913 (1980)
- 10) K. M. Leung et al : Phys. Rev. B 21, 4017 (1980)
- 11) K. Maki : J. Low Temp. Phys. 41, 327 (1980)
- 12) I. Harada, K. Sasaki and H. Shiba : Solid State Comm. 40, 29 (1981).
- 13) H. Yoshizawa, K. Hirakawa, S. K. Satija and G. Shirane : Phys. Rev. B 23, 2298 (1981).
- 14) K. Adachi : J. Phys. Soc. Japan (in press)
- 15) H. Shiba and K. Adachi : J. Phys. Soc. Japan 50, 3278 (1981)
- 16) I. U. Heilmann et al : Phys. Rev. B 24, 3939 (1981)
- 17) J. P. Boucher et al : preprint.